Proceedings of 5º Encuentro de Potencia, Instrumentación y Medidas, IEEE, October 19-20, 1999, Montevideo, Uruguay

Generador de tensión para calibrar Flickermeters

Diego Bentancur
UTE

Walter Mandl
UTE

Ernesto Olivera
UTE

Resumen: se presenta el problema del flicker en las redes eléctricas. Se describen las características de los equipos medidores de flicker ("flickermeter"). Finalmente se propone un generador de señales para calibrar flickermeters.

Palabras clave: flicker, flickermeter, calibración, power quality.

I. INTRODUCCION

Se llama flicker a la sensación experimentada por el sistema visual humano sometido a variaciones de intensidad de iluminación [1]. De acuerdo a la amplitud y a la frecuencia de las variaciones de iluminación se puede producir una sensación de molestia en las personas.

Las fluctuaciones de la tensión en los sistemas de potencia producen variaciones de la iluminación. En particular las lámparas incandescentes son sensibles a este fenómeno.

Las variaciones de carga producen perturbaciones en la tensión de la red a la que están conectadas. El horno de arco es el tipo de carga más conocido y estudiado como fuente del flicker [2][3][4]. Otras fuentes de perturbaciones usuales son las bombas de calor, compresores, molinos, equipos de soldadura y montacargas. Las empresas eléctricas comenzaron a estudiar este problema a partir de las reclamaciones de sus clientes. Aunque existen investigaciones desde principio de siglo [1][5], es a partir de la década de los 80 que este tema toma importancia debido a la creciente aparición de cargas no lineales, asociadas al auge de la electrónica de potencia. Surgió entonces la necesidad de medir en forma objetiva el nivel de perturbación en los puntos de la red.

Las variaciones cíclicas del valor eficaz de la tensión se pueden modelar como una modulación de la onda de frecuencia industrial (50 Hz, 60 Hz), por otra señal de menor amplitud y de frecuencia en el rango de 0,1 Hz a 30 Hz [1]. A determinadas frecuencias, variaciones tan pequeñas en amplitud como del 0,2 % pueden producir un cambio en la iluminación perceptible por el ojo humano. Del estudio de la sensibilidad del ojo humano a modulaciones de diferente amplitud y frecuencia, se determinó una curva umbral para cada tipo de modulación. Modulaciones de amplitud por encima del umbral producen variaciones de iluminación que ocasionan molestias.

Las técnicas utilizadas más usuales para mitigar los efectos de las perturbaciones, consisten en alimentar las cargas perturbadoras en puntos de la red con mayor potencia de cortocircuito o utilizar compensadores estáticos de reactiva [3][6].

II. IMPLEMENTACIÓN DEL FLICKERMETER

Los primeros instrumentos diseñados para la evaluación del flicker surgieron en Inglaterra, Francia, Alemania y Japón [1]. El propósito de los instrumentos era detectar las fluctuaciones en la tensión y procesarlos de tal manera de obtener una indicación de la percepción visual para un observador promedio. Tuvieron en cuenta el comportamiento del flujo luminoso de la lámpara incandescente ante variaciones en la tensión así como también la respuesta del ojo humano a las variaciones en la iluminación. Sin embargo, las diferencias entre los métodos utilizados hacían que los resultados de las experiencias realizadas no pudieran ser comparados entre sí.

Esto motivó que la UIE (Union Internationale d'Electrothermie) formara un grupo de trabajo encargado de normalizar el sistema de medida (UIE WG Disturbances), llegando a la especificación del flickermeter estándar[1]. Sus características más importantes son:

- El instrumento permite evaluar la sensación instantánea del flicker expresada en unidades de perceptibilidad. Se interpreta como el cambio en la iluminación percibido por el ojo humano ante un cambio individual en el valor eficaz de la tensión. La salida del instrumento toma el valor de la unidad en el umbral de percepción de flicker para el observador promedio. En la Fig. 1 se muestran las curvas umbrales normalizadas para fluctuaciones rectangulares y sinusoidales. Se grafica la amplitud relativa de la fluctuación (cociente entre las amplitudes de la modulante y portadora), en función de la frecuencia de la modulante.

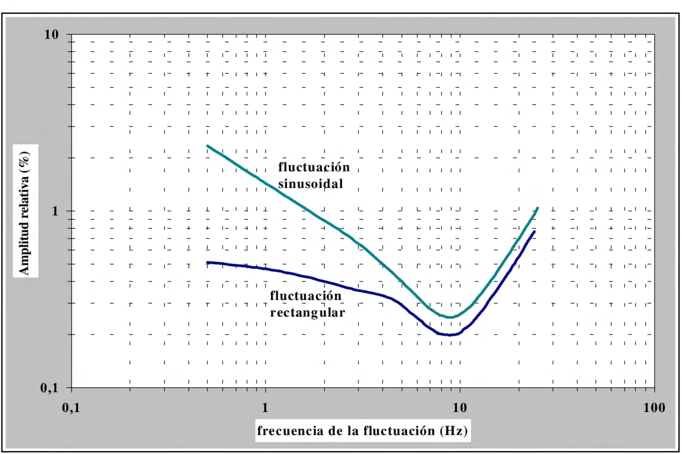


Fig. 1. Curvas umbrales de perceptibilidad para fluctuaciones rectangulares y sinusoidales.

- El instrumento produce el mismo resultado ante la misma percepción de flicker, independientemente de la forma de onda de la fluctuación. Es apropiado para medir fluctuaciones producidas por diferentes tipo de cargas.

- El resultado de la medida es un valor numérico adimensionado que puede ser comparado contra un valor admisible.
- Permite una evaluación estadística de la percepción instantánea de flicker. Esto se debe a las variaciones que se producen en el flicker a lo largo del tiempo. Se define un coeficiente de severidad de flicker de corta duración llamado Pst, expresado en p.u. [1]. Valores de Pst superiores a 1 p.u. indican un nivel de flicker que produce molestias a un observador promedio.

La IEC (International Electrotechnical Commission) se basó en este documento para definir un flickermeter normalizado por medio de la norma 60868 [7][8]. En la Fig. 2 se muestra un esquema simplificado del instrumento. El primer bloque representa un adaptador de la tensión de red (V(t)) al nivel que maneja el instrumento. El segundo bloque representa un demodulador que modela la respuesta del sistema lámpara - ojo humano a las fluctuaciones de tensión. La salida de este bloque es la percepción instantánea de flicker S(t). El tercer bloque consiste en la evaluación estadística de la percepción instantánea durante un periodo de observación de 10 minutos y da como resultado el valor de Pst.

III. CALIBRACIÓN DE UN FLICKERMETER.

Para la calibración de un flickermeter, se especifican dos tipos de ensayos de acuerdo a las normas IEC [7][8]. El primer ensayo se refiere a la respuesta del instrumento referida a la sensación instantánea de flicker. El ensayo consiste en someter al flickermeter a una señal formada por una sinusoide portadora, modulada por una tensión sinusoidal o rectangular, cuyos valores de amplitud y frecuencia están refereridos a las curvas umbrales de percepción (Fig. 1). Dada la frecuencia de la fluctuación, se modifica la amplitud hasta que el valor de pico de S(t) sea la unidad. La amplitud relativa de la fluctuación debe diferir menos de un 5 % con respecto al valor correspondiente de la curva umbral, para la frecuencia de ensayo. El restante ensayo evalúa el desempeño del flickermeter incluyendo el análisis estadístico. Consiste en determinar cuales son los niveles de fluctuación para los que la evaluación de la severidad del flickermeter Pst se determina con un error menor al 5 %. Se somete al flickermeter a trenes regulares de cambios de tensión rectangulares según la tabla 1. En todos los casos la severidad de flicker Pst indicada por el instrumento debe ser 1,0 p.u. ± 5 %.

El fabricante debe determinar el rango de amplitud en los cambios de tensión para los que el valor correspondiente de Pst se entrega con una precisión del 5 % o mejor. Para verificarlo se mantiene fija la razón de repetición de los cambios y se varía la amplitud obteniéndose los correspondientes valores de Pst. El flickermeter debe tener un comportamiento lineal ante variaciones en la amplitud de los cambios de tensión a razón de repetición constante. Por ejemplo, si a 7 cambios por minuto se incrementa la amplitud de 1,459 % a 4,377 % (se incrementa en un factor de 3), entonces el Pst debe aumentar de 1,0 p.u. ± 5 % a 3,0 p.u. ± 5 %.

Tabla 1. Especificaciones de ensayo para Pst = 1.

Cambios por minuto	Cambios de tensión ΔU/U (%)
1	2,724
2	2,211
7	1,459
39	0,906
110	0,725
1620	0,402

Dada la variedad de formas de onda necesarias, se concluye que es útil disponer de un generador de señales que permita reproducir las formas de onda indicadas. Para ello el generador debe realizar modulaciones entre una portadora sinusoidal y diversos tipos de ondas modulantes (rectangulares y sinusoidales).

IV. IMPLEMENTACIÓN DEL GENERADOR

A. Descripción del hardware.

El equipo consta de una tarjeta adquisidora de datos modelo AT-DSP2200 de National Instruments [9][10]. Esta tarjeta permite adquirir o generar señales analógicas cuyo ancho de banda esté entre 0 kHz y 22 kHz (señales de audio). Además incluye un DSP AT&T WE DSP32C, 512 kbyte de memoria, puertos paralelos y seriales y acceso DMA desde y hacia la memoria de la PC. Este dispositivo tiene una potencia de cálculo de 25 MFLOPS. Esto permite implementar sistemas de procesamiento digital de señales en tiempo real, como es el caso del generador de señales de flicker. La tarjeta contiene 2 canales AD y 2 canales DA, con una frecuencia de muestreo máxima de 51.2 kHz. La resolución de los canales es de 16 bits. Las señales son muestreadas simultáneamente en ambos canales AD. Se sobremuestrea la señal 64 veces mediante un conversor sigma-delta y se aplica un filtro digital pasabajo, de manera de evitar el fenómeno del aliasing. Un proceso similar se realiza para la conversión DA. Se pueden elegir distintas frecuencias de muestreo para la conversión DA, desde 4 kHz a 51.2 kHz. En el caso del generador de señales de flicker se decidió utilizar una frecuencia de muestreo de 51.2 kHz.

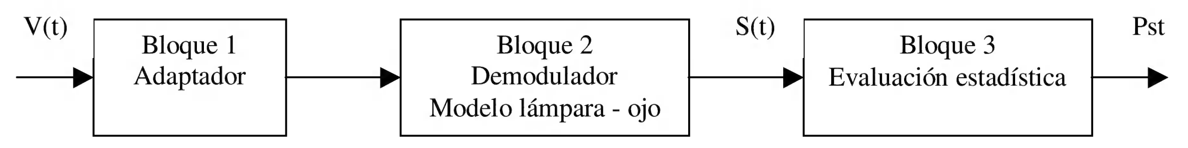


Fig. 2. Modelo simplificado del flickermeter normalizado.

B. Descripción del software

Consta de 2 programas diferentes que pueden ser ejecutados en forma simultánea:

1) Programa de modulación, ejecutado por la DSP.
2) Programa de interfase con el usuario, ejecutado en la PC.

1) Programa de modulación.

Este programa fue escrito en lenguaje assembler DSP32C, para poder optimizar los tiempos de procesado de datos. Una vez que es cargado el programa en la memoria de la DSP, se ejecuta una rutina de calibración. Luego se mantiene en un loop ejecutando una rutina de interpolación y generación de la señal. En la memoria de la DSP están almacenadas 2 tablas. Una tabla (C) contiene un ciclo de la señal portadora, muestreada con un tiempo entre muestras Tc. La otra tabla (M) contiene un ciclo de la señal modulante, muestreada con un tiempo entre muestras Tm. Usualmente Tm es distinto a Tc y a su vez pueden ser diferentes al período de conversión DA de la tarjeta.

La rutina de calibración inicializa la DSP para la correcta comunicación serial con los conversores. Además ajusta la frecuencia de muestreo a 51.2 kHz y realiza una compensación digital de la tensión de offset de los conversores DA y AD.

El valor de tensión y(tk), que debe generar el conversor DA en un instante tk de muestreo, es calculado a partir de la expresión

$$y(tk) = c(tk) * (1 + m(tk)) \qquad (1)$$

donde c(tk) y m(tk) son los valores de la señal portadora y de la señal modulante, ambas en el instante tk. Usualmente estos valores no aparecen explícitamente en las tablas, sino que deben ser interpolados en ellas. Si se intenta realizar tablas que contengan todos los puntos de un ciclo de modulación a generar, muestreados a la frecuencia de conversión DA, implicaría realizar tablas de gran tamaño. El consiguiente gasto de la memoria disponible impide realizar modulaciones de baja frecuencia (menores a 1 Hz). Mediante el método de interpolación de tablas, se obtienen señales del orden de mHz o menores aún.

La rutina de interpolación para la señal modulante m(tk) tiene como variables el período (Tm) a la cual está muestreada la tabla con la señal a generar, y el instante (tk) en que se quiere evaluar la interpolación. El valor de m(tk) se obtiene de la siguiente interpolación lineal

$$m(tk) = M(i) + (M(i+1) - M(i)) * (tk / Tm), \qquad (2)$$

donde M(i) el elemento i-ésimo de la tabla de la señal modulante. Un proceso análogo se realiza para obtener c(tk), a partir de la tabla C y de tk. De esta manera, recorriendo cíclicamente las tablas C y M obtenemos el valor de y(tk) para cualquier tk.

Por último, una rutina de generación se encarga de generar la tensión y(tk) y de incrementar el valor de tk. El nuevo instante de generación se obtiene de incrementar tk en un período de conversión DA. El proceso de interpolación y generación es realizado normalmente en forma continua. La rutina permite ser interrumpida desde el programa de interfase con el usuario en la PC, para poder modificar cualquiera de las tablas. Una vez que se almacena una nueva tabla, automáticamente comienza la generación de la señal.

2) Programa de interfase con el usuario.

El programa de interfase con el usuario fue escrito en lenguaje C, en ambiente LabWindows CVI 5.0 para Windows95 o Windows NT4.0. Este programa cumple básicamente 2 funciones:

- crear formas de onda de flicker. Para ello calcula las tablas C y M.
- enviar dichas tablas al DSP para que se genere la tensión modulada deseada.

El programa consta de una pantalla principal que muestra las señales calculadas y diversos paneles en los que se puede configurar diversas formas de onda. Una vez que se han generado las formas de onda deseadas, es posible descargarlas en la tarjeta DSP mediante 2 botones ubicados en el panel principal. Un botón descarga la portadora y el otro la modulante. Es posible guardar en un archivo de texto los parámetros y/o las tablas generadas, de forma de poder ser usadas nuevamente. En la Fig. 3 se observa una modulación entre una portadora sinusoidal de 50 Hz y 1 V rms y una modulante rectangular de 3 Hz y 0,5 V pico a pico.

Paneles de Modulantes: se trata de 3 paneles similares entre sí. Cada uno permite generar un tipo de forma de onda: sinusoidal, triangular o rectangular. En todos los casos se puede ajustar los diversos parámetros que definen la forma de onda tales como la frecuencia, la amplitud, ciclo de trabajo, etc. En la Fig. 4 se ve el panel para generar señales rectangulares. Es posible además cargar archivos con curvas generadas externamente (p.e. usando una planilla de cálculo).

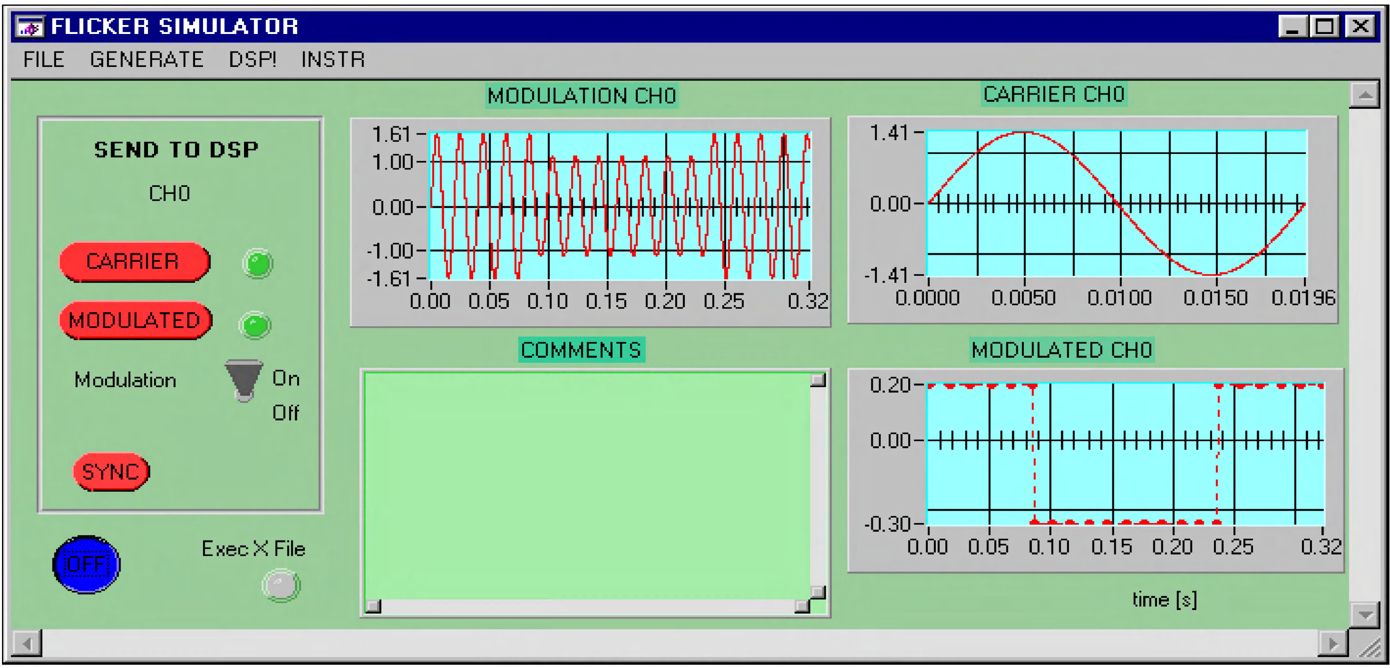


Fig. 3. Panel principal del generador de señales.

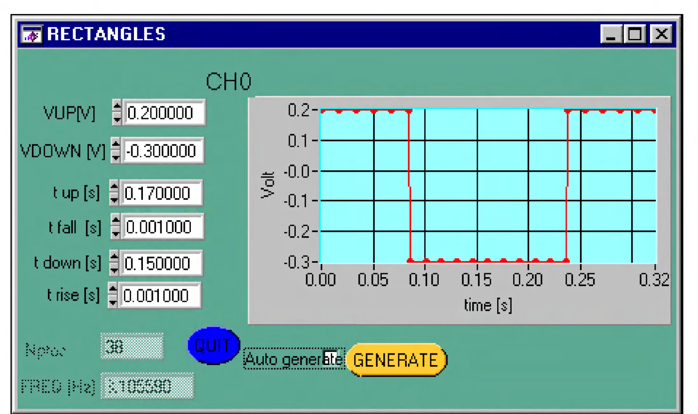


Fig. 4. Panel para generación de señales modulantes rectangulares.

Panel de Portadora: es un panel similar a los anteriores que permite configurar la señal portadora. Se trata siempre de una sinusoide en la cual se elige la amplitud, el período, la frecuencia y el número de puntos.

Puesto que la calibración de un flickermeter es un proceso que requiere varias horas, se implementó la automatización de la generación y la transferencia de tablas a la DSP mediante archivos de procesado por lotes. Para ello se ha definido un conjunto de comandos que realizan todas las operaciones que dispone el usuario mediante los paneles antes mencionados. Se agrega además un comando que permite anidar archivos de procesado por lotes. En primer lugar, el usuario del programa escribe en un archivo de texto la secuencia de operaciones deseadas. Luego carga dicho archivo en el programa de interfase con el usuario. El programa de interfase primero realiza un chequeo de la sintaxis de los comandos incluidos en el archivo (p.e. el número de parámetros de cada comando sea el correcto) antes de ejecutar los comandos. Una caja de diálogo en el menú principal va indicando que comando se está ejecutando.

V. ERRORES EN GENERACIÓN DE TENSIÓN CONTINUA

Como primera etapa en el estudio de errores para el generador de señales, se analizó el caso de tensión continua. Se consideran dos tipos de error: offset y fondo de escala. Para estimar estos errores se definen dos ensayos.

El ensayo para el error por offset consiste en escribir 0 V en el buffer de salida del canal CH0 de la tarjeta durante diez horas y estudiar las variaciones de la tensión resultante a lo largo del tiempo. En la Fig. 5 se muestra una gráfica de la tensión de offset durante el tiempo de medida. El valor medio del offset es 580 µV y la desviación estándar es 20 µV.

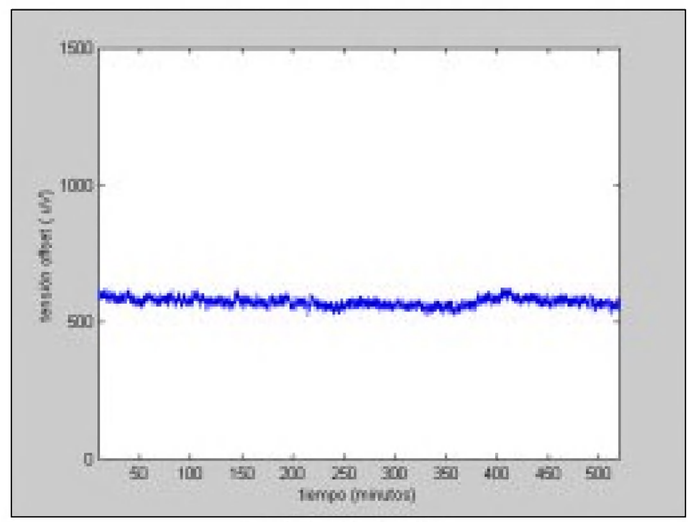


Fig. 5. Tensión de offset.

El ensayo para el error de fondo de escala consiste en generar una tensión continua durante 10 minutos. Luego se repite la medida variando la amplitud de la tensión generada de a saltos regulares, de manera de cubrir el rango completo de la tarjeta. Para cada escalón de tensión generado se toman 100 muestras y se calculan valores medios y desviaciones estándar. En la Fig. 6 se presenta una gráfica con el error absoluto obtenido, en función de la representación en bits de la tensión deseada. Se observa que el error es fuertemente lineal en todo el rango. La diferencia máxima respecto a la recta que mejor aproxima la curva, es de 43 µV. En la Fig. 7 se observa la desviación estándar para cada escalón de tensión generado. Los valores de desviación estándar son similares en todo el rango, con una media de 11 µV.

En ambos casos la tensión es medida mediante un voltímetro HP3855A de 6 dígitos y ½. Para realizar estas pruebas se escribió un programa en LabWindows CVI que automatiza las medidas. El voltímetro HP3855A es controlado mediante una interfase GPIB.

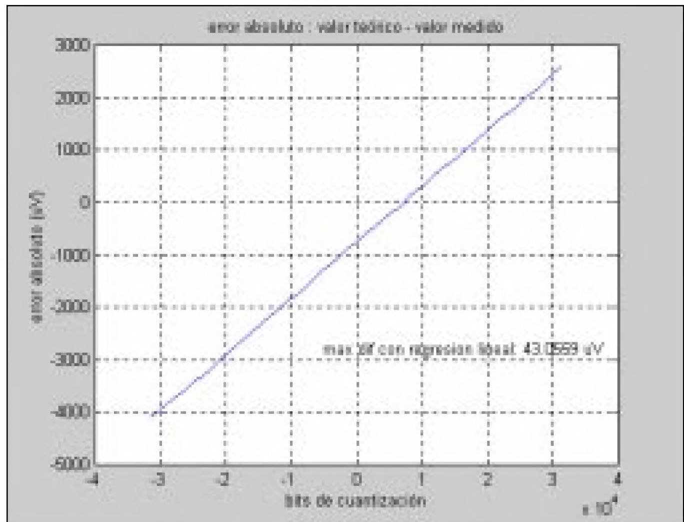


Fig. 6. Error absoluto de fondo de escala.

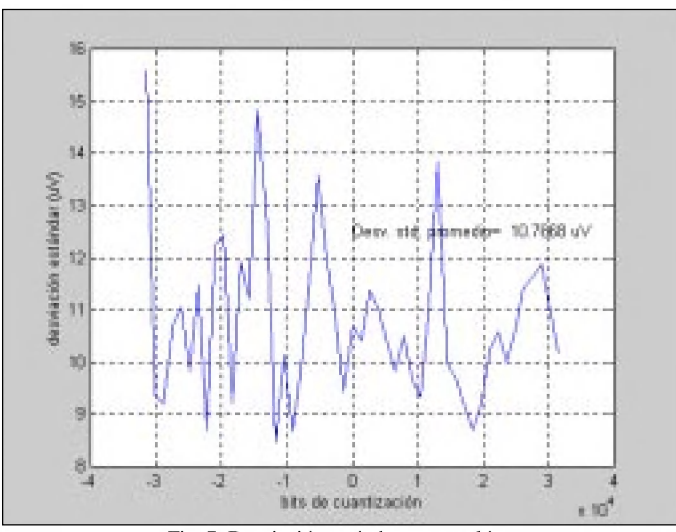


Fig. 7. Desviación estándar por escalón.

VI. CONCLUSIONES

Se estudia el método de ensayo para la calibración de equipos medidores de flicker de acuerdo a la normativa internacional. Se presenta un generador digital de señales basado en estas normas. La implementación de un algoritmo para interpolar tablas con las señales modulantes, permite realizar modulaciones de muy baja frecuencia, con escaso costo de memoria. Se pueden obtener formas de onda sofisticadas en forma periódica por este generador. También es posible reproducir tensiones sinusoidales con caídas abruptas (voltage sags). Los errores en la generación de tensión continua son evaluados observándose una fuerte linealidad en la conversión DA.

VII. AGRADECIMIENTOS

Se agradece al LABORATORIO UTE por el apoyo brindado para la realización de este proyecto.

VIII. REFERENCIAS

[1] Flicker Measurement and Evaluation. Second Revised Edition, UIE 1991.

[2] Le Tang, Sharma Kolluri, Mark McGranaghan. “Voltage flicker prediction for two simultaneously operated ac arcfurnaces”, IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 12, Nº 2, April 1997.

[3] Bharat Bhargava. “Arc furnace flicker measurements and control”, IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 8, Nº1, January 1993.

[4] Srinivas Varadan, Elham B. Makram, Adly A. Girgis. “A new time domain voltage source model for an arc furnace using EMTP”, IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 11, Nº3, July 1996.

[5] L.Peretto, A.E.Emanuel, “A theoretical study of the incandescent filament lamp performance under voltage flicker” , IEEE Trans. Power Delivery, vol 12, no 1, January 1997, 279-288.

[6] J.Jatskevich, O. Wasynczuk,L.Conrad. “A method of evaluating flicker and flicker-reduction strategies in power systems”, IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 13, Nº 4, October 1998.

[7] IEC 60868. Flickermeter. Funtional and Design Specifications, 1986.

[8] IEC 60868-0 Flickermeter, Part 0: Evaluation of flicker severity, 1991.

[9] National Instruments, “AT-DSP200 User Manual”, March 1992.

[10] AT&T, “WE DSP32C Digital Signal Processor Information Manual”, 1990.

IX. BIOGRAFIAS



Walter Mandl nació en Montevideo en 1971. Es estudiante de la carrera de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de la República desde 1990. En 1994 ingresó al Laboratorio UTE. En sus áreas de interés destaca power quality y control automatizado de instrumentos. Es miembro estudiantil de IEEE desde 1996.



Diego Bentancur nació en Montevideo en 1970. Es estudiante de la carrera de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de la República desde 1989. En 1994 ingresó a UTE y trabaja desde entonces en distribución de energía eléctrica.



Ernesto Olivera nació en Montevideo en 1970. Es estudiante de la carrera de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de la República desde 1989. En 1995 ingresó a UTE, trabaja desde entonces en distribución de energía eléctrica.